

Untersuchungen zu einem hersteller- und typunabhängigen Verfahren zur Kalibrierung von Schallintensitätssonden im akustischen Freifeld

Andreas Kunadt¹

¹ SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden, Email: Andreas.Kunadt@spektra-dresden.com

Einleitung

Konventionell werden für die Kalibrierung von Schallintensitätssonden Druckkammerkalibratoren verwendet. Allerdings liefert eine Einpunkt-Druckkammerkalibrierung keine Aussagen über den Frequenzgang der Schallintensitätssonde und ist zudem nur für Zweimikrofonsonden (pp-Sonden), die auf der Messung des Druckgradienten basieren, anwendbar.

Motivation

Für den Einsatz eines Kalibrierverfahrens in einem Kalibrierlaboratorium muss dieses vor allem für eine möglichst große Anzahl verschiedener Prüflingstypen geeignet sein. Daraus ergibt sich die Forderung nach Hersteller- und Typunabhängigkeit.

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, Schallintensitätssonden zu kalibrieren. Prinzipiell lassen sich diese Kalibriermöglichkeiten in drei Gruppen entsprechend des verwendeten Schallfeldtyps einteilen: Druckkammerkalibrierung, Kalibrierung im Stehwellenfeld und Freifeldkalibrierung. Sowohl die Druckkammerkalibrierung als auch die Kalibrierung im Stehwellenrohr erfüllen die Anforderungen an ein Verfahren für die Kalibrierung von Schallintensitätssonden in Kalibrierlaboratorien nicht bzw. unzureichend:

Druckkammer-Kalibrierung

- nur eine Frequenz
- nur für Zweimikrofonsonden
- nur für bestimmte Sondenhersteller/-typen

Stehwellenrohr-Kalibrierung

- eingeschränkter Frequenzbereich
- Richtung des Schalleinfalls nicht beliebig änderbar

Dagegen bietet die Freifeldkalibrierung:

- + Bereitstellung echter Intensität und Schnelle
- + großer Frequenzbereich
- + Möglichkeit zur Untersuchung der Richtungsabhängigkeit

Bereitstellung von Schallschnelle und Schallintensität

Für die Kalibrierung der Größen Schallschnelle und Schallintensität existieren keine Normale. Daher muss die Bestimmung der bereitgestellten Schallschnelle und Schallintensität indirekt erfolgen. Als Bezugsgröße wird der Schalldruck gewählt, der sehr genau gemessen werden

kann. Unter Annahme eines idealen akustischen Freifeldes sowie einer monopolarartigen Schallquelle ergeben sich folgende Zusammenhänge

$$v = \frac{p}{Z} \quad (1)$$

$$I = \frac{p^2}{Z} \quad (2)$$

Dabei bezeichnet v die Schallschnelle, p den Schalldruck, I die Schallintensität und Z die spezifische akustische Impedanz der Luft am Messpunkt.

Verwendet man als Signale Sinustöne, lassen sich die genannten Größen komplexwertig darstellen. Damit erhält man auch Information über die Phase der Größe. Im Folgenden werden nur die komplexwertigen Amplituden der Größen betrachtet.

Für eine monopolarartige Schallquelle berechnet sich die (komplexwertige) spezifische akustische Impedanz zu

$$Z = \frac{\rho c}{\left(1 + \frac{1}{jkr}\right)} \quad (3)$$

worin ρ die Dichte der Luft, c die Schallgeschwindigkeit, k die Wellenzahl und r den Abstand vom Messpunkt zum akustischen Zentrum der Schallquelle bezeichnet.

Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz Z

Für die genaue Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz Z muss die Lage der akustischen Zentren der Schallquelle bekannt sein. Diese lässt sich mit Hilfe des Abstandsgesetzes ermitteln. Der Schalldruck nimmt dabei mit zunehmendem Abstand zur Schallquelle ab. Legt man einen Referenzpunkt fest, so lassen sich die gemessenen Schalldrücke relativ zum Schalldruck am Referenzpunkt darstellen

$$|p_1| = \frac{r_0}{r_1} |p_0| \quad (4)$$

Ausgehend von obiger Gleichung lässt sich mit Hilfe iterativer Verfahren eine Kurve finden, die zum einen dem Abstandsgesetz folgt und sich zum anderen bestmöglichst in die gemessenen Schalldruckverläufe einpasst (siehe Abbildung 1). Damit erhält man als Ergebnis den Abstand des akustischen Zentrums zum Messpunkt sowie den Nachweis, dass die Annahmen (echtes Freifeld, Schallquelle als Monopol) gültig sind. Die Dichte der Luft und

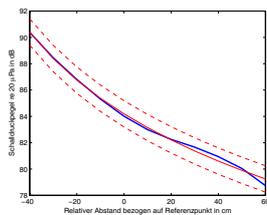


Abbildung 1: Gemessene Schalldruckpegelverläufe (blau) und Sollverlauf gemäß Abstandsgesetz (rot) bei der Frequenz $f = 250$ Hz. Der Toleranzbereich (gestrichelt) entspricht den Anforderungen an reflexionsarme Räume nach DIN EN 3745.

die Schallgeschwindigkeit sind Funktionen der Temperatur bzw. des Luftdrucks. Um die Genauigkeit bei der Bestimmung der spezifischen akustischen Impedanz zu maximieren, werden die Umgebungsbedingungen während der Kalibrierung protokolliert und für die exakte Berechnung der Dichte der Luft und der Schallgeschwindigkeit verwendet:

$$\varrho = f(\vartheta, B) = \frac{B}{R_S(273,15 + \vartheta)} \quad (5)$$

$$c = f(\vartheta) = \sqrt{\gamma R_S(273,15 + \vartheta)} \quad (6)$$

Darin bezeichnet ϑ die Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$, B den absoluten Luftdruck in Pa, R_S die spezifische Gaskonstante in $\frac{\text{J}}{\text{kg K}}$ und γ den Adiabatenkoeffizienten.

Verwendetes Messsystem

Das für die Untersuchungen verwendete Messsystem basiert auf dem Kalibriersystem CS18 SPL der SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden und umfasst folgende Komponenten:

- reflexionsarme Messkammer mit einem Breitbandlautsprecher als Schallquelle
- Signalgenerator
- Transientenrekorder
- Schallpegelmesseinheit
- Referenzmikrofon
- MATLAB-Software

Ergebnisse

Ergebnis der Untersuchungen ist ein Kalibrierverfahren, mit dem sowohl Schallintensitätssonden als auch Schallschnellewandler im akustischen Freifeld kalibriert werden können. Die Kalibrierung des Schallschnelle- und Schallintensitätsübertragungskoeffizienten erfolgt nach dem Substitutionsverfahren. Dabei wird mit einem Referenzmikrofon der Schalldruck am Messpunkt genau gemessen. Mit den Beziehungen aus den Gleichungen (1) und (2) ergibt sich damit die bereitgestellte Schallintensität bzw. -schnelle.

Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen Schallintensitätsübertragungsmaße für eine Zweimikrofonsonde (Microtech Gefell Typ SIS90, Abbildung 2) und eine Schallintensitätssonde mit Schallschnellewandlern (Microflown Typ USP, Abbildung 3).

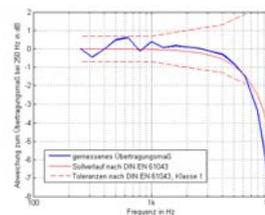


Abbildung 2: Gemessenes Übertragungsmaß einer Zweimikrofonsonde (blau) mit Sollverlauf (rot) und Toleranzbereich für Sonden der Genauigkeitsklasse 1 (gestrichelt) nach DIN EN 61043.

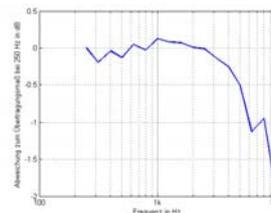


Abbildung 3: Gemessenes Übertragungsmaß einer Schallschnellewandler mit Schallschnellewandlern.

Zusammenfassung

Das entwickelte und implementierte Verfahren zur Freifeldkalibrierung von Schallintensitätssonden ist unabhängig vom Sondentyp (Zweimikrofonsonden und Sonden mit Schallschnellewandlern) und ermöglicht die Kalibrierung in einem großen Frequenzbereich (250 Hz bis 10 kHz) bei Schalldruckpegeln von 74 dB bis 94 dB (Schallintensitätspegel und Schallschnellepegel äquivalent). Es eignet sich damit für den Einsatz in Kalibrierlaboratorien. Für Zweimikrofonsonden ist zudem eine Überprüfung der Konformität mit der Norm DIN EN 61043 möglich (für Intensitätssonden mit Schallschnellewandlern existieren derzeit keine Normen).

Folgende Parameter können derzeit kalibriert werden:

- ✓ Übertragungsmaße der einzelnen Wandler (Schalldruckwandler, Schallschnellewandler)
- ✓ Übertragungsmaß der Sonde (Schallintensität)
- ✓ Phasenunterschied zwischen Schallschnellewandler und Schalldruckwandler bzw. zwischen den Mikrofonen von Zweimikrofonsonden

Aufbauend auf dem entwickelten Kalibrierverfahren soll zukünftig auch die Kalibrierung der Richtungsabhängigkeit und der Restintensität ermöglicht werden. Dazu sind allerdings weitere Untersuchungen nötig.

In Kombination mit der Kalibrierung im Stehwellenfeld (Kundtsches Rohr) lässt sich der Frequenzbereich nach unten erweitern.